

## **INFORME DE TRABAJO FINAL DE CARRERA**

Título: Efecto de distintos marcos de plantación en la conformación de la relación diámetro a la altura del pecho – altura total en parcelas de *Populus x canadensis* “Conti 12” de 9 años de edad.

Alumno: Antonio José Barotto

Director: Jorge Luis Marquina

Fecha de entrega: 08/11/2012

# **EFFECTO DE DISTINTOS MARCOS DE PLANTACIÓN EN LA CONFORMACIÓN DE LA RELACIÓN DIÁMETRO A LA ALTURA DEL PECHO – ALTURA TOTAL EN PARCELAS DE *POPULUS X CANADENSIS* “CONTI 12” DE 9 AÑOS DE EDAD**

## **INTRODUCCIÓN**

Alrededor de 70 países cultivan Salicáceas (*Populus spp.*, *Salix spp.*) en macizos, cortinas, sistemas agroforestales y conjuntos paisajísticos (Ball *et al.*, 2005). En el año 2004 esta familia ocupaba una superficie superior a los 80 millones de hectáreas en todo el mundo (CIA, 2004). La Federación Rusa, Canadá y Estados Unidos son los países que cuentan con la mayor superficie de bosques nativos de álamos y sauces, mientras que China, India y Pakistán cuentan con las plantaciones más extensas (Ball *et al.*, 2005).

El cultivo de Salicáceas en Argentina ocupa un lugar de preponderancia en cuanto a lo que al sector forestal respecta, ubicándose en el tercer lugar en importancia detrás de pinos (*Pinus spp.*) y eucaliptos (*Eucalyptus spp.*), en relación al volumen de extracción anual (DPF - MAGyP, 2009) y a la superficie ocupada (Dirección de Forestación - SAGPyA, 2001). La superficie implantada con Salicáceas es de aproximadamente 90.000 ha, de las cuales alrededor de 50.000 corresponden al género *Populus* (CIA, 2008). Dentro de esta superficie se incluyen plantaciones forestales, sistemas agroforestales, cortinas y formaciones destinadas a protección (CIA, 2008). Considerando la distribución geográfica, las áreas con plantaciones de álamos pueden agruparse en tres grandes zonas: el delta de los ríos Paraná y Uruguay, la llanura bonaerense y los oasis bajo riego de las zonas áridas (Comisión Nacional del Álamo, 2004).

Cada una de estas regiones presenta características diferentes que condicionan

marcadamente los ciclos de producción, las técnicas de plantación y las modalidades de cosecha y transporte (Comisión Nacional del Álamo, 2004).

La Pampa Húmeda cuenta con un estimado de 5.000 ha cultivadas con Salicáceas, siendo estas principalmente de álamos (Achinelli *et al.*, 2004). El destino de estas plantaciones corresponde a: 1. Producción de pulpa para papel, en el caso de los establecimientos de Teodelina (Partido de General López, Santa Fe) y Palentelén (Partido de Alberti, Buenos Aires), y 2. Aserrado y debobinado, para aquellas ubicadas en Morse y Vedia (Partidos de Junín y Leandro N. Alem, Buenos Aires) (Achinelli *et al.*, 2004). En el caso de las masas destinadas a la producción de pulpa, su importancia estratégica reside en que permiten el abastecimiento a la industria de manera ininterrumpida, independizándose de las situaciones de inundación que comúnmente se producen en el Delta, que demoran e incluso interrumpen los suministros de madera (Achinelli *et al.*, 2004).

En estas forestaciones se utilizan principalmente clones de *P. deltoides* y *P. x canadensis*; en Teodelina y Palentelén los clones más utilizados son *P. deltoides* “Stoneville 66”, *P. x canadensis* “Conti 12” y *P. deltoides* “208/68”, mientras que en Morse y Vedia los más utilizados son *P. deltoides* “Stoneville 67”, “Stoneville 109” y “Australiano 129/60” (Achinelli, 2006).

Conti 12 es un clon de procedencia italiana que fue introducido por el Dr. Marcelo Conti en el año 1939 (Borodowski *et al.*, 2004). Actualmente es uno de los clones más utilizados en la región debido a que posee una amplia adaptabilidad, utilizándose tanto en aquellos sitios en los cuales hay problemas de drenaje como en ambientes de texturas arenosas (Achinelli, 2006).

Esta aptitud demostrada para Conti 12 en la Pampa Húmeda deviene en la necesidad de contar con buenas alternativas para describir la evolución de la producción a lo largo de las rotaciones en diferentes situaciones ambientales y de prácticas de

establecimiento y conducción de rodales.

Después de la calidad de sitio, la densidad del rodal es el segundo factor en importancia para la determinación de la productividad de una masa forestal; a su vez, es el principal factor que el silvicultor puede controlar para alcanzar los objetivos de manejo (Daniel *et al.*, 1982). La densidad puede expresarse en términos absolutos o relativos: entre los índices de densidad absolutos se encuentra el número de árboles y el área basal por hectárea; un índice relativo es el cociente del área basal actual y el área basal de un rodal equivalente de densidad normal (Prodan *et al.*, 1997). En rotaciones cortas y sin raleos, la densidad de plantación constituye una importante decisión en el manejo forestal, afectando el volumen del rodal, el tamaño de las trozas y el turno de corta (Coetzee, 1991). La producción total en volumen de un rodal para un sitio dado es constante y óptima para un rango amplio de densidades, y por fuera de este rango la producción puede disminuir, pero no incrementarse (Smith, 1962); esta se incrementa al aumentar la densidad hasta el punto en el cual el rodal alcanza la plena ocupación del sitio (Baskerville, 1962). Por otro lado, el tamaño medio de un árbol para una edad dada está determinado por el espacio que previamente tuvo disponible para crecer (Clutter, 1983). Los cambios en la densidad no afectan en gran medida al crecimiento en altura, pero tienen una gran influencia sobre el crecimiento en diámetro, incluso a densidades muy bajas y particularmente en el caso de especies de rápido crecimiento e intolerantes al sombreado, por lo que se necesitan grandes espaciamientos para alcanzar el máximo crecimiento en diámetro. (Clutter, 1983). El marco de plantación fija las distancias entre las plantas (espaciamiento), que se encuentran en los nudos (intersección entre filas e hileras) de una malla generalmente rectangular o cuadrada (López Peña, 2008).

El mecanismo básico para estimar el volumen en pie de los árboles consiste en convertir a volumen algunas características del árbol medibles a campo, siendo

entonces razonable establecer alguna relación entre esas características del árbol y su volumen (Wabö, 2006). En general, el contenido volumétrico del fuste se considera función de las variables diámetro a la altura del pecho (**DAP**), altura (**H**) y factor de forma (**f**). Cuando estas variables del árbol son utilizadas en un modelo para estimar el volumen del árbol, se habla de una función general de volumen (Prodan *et al.*, 1997).

El **diámetro a la altura del pecho (DAP)** es el parámetro usado más ampliamente para caracterizar árboles individuales o conjuntos de ellos. En el caso de aplicación a situaciones de masa, puede ser sintetizado en un parámetro único (generalmente el **DAP** medio) o presentado en frecuencias correspondientes a clases definidas por tamaño. La distribución de diámetros puede ser resumida en una tabla de rodal, que representa el número de árboles por unidad de área y por clase de diámetro, o puede usarse para obtener parámetros estimadores de funciones de distribución, que luego son usados para describir la estructura del rodal (Husch *et al.*, 1982).

La **altura** es otro parámetro ampliamente utilizado para describir la estructura de un rodal. Es importante en la conformación de volúmenes individuales y de la masa. Además, es comúnmente usado como medida de la calidad de sitio y de la productividad del rodal. La estructura vertical es un factor preponderante en la definición de muchos tratamientos silvícolas (Husch *et al.*, 1982).

La altura del árbol resulta un término ambiguo, a menos que esté claramente definido. Una clasificación considerablemente funcional podría incluir las siguientes alturas (Husch *et al.*, 1982):

- Altura total (**HT**): distancia a lo largo del eje del fuste entre el suelo y la punta del árbol.
- Altura del fuste: distancia a lo largo del eje del fuste entre el suelo y el punto de comienzo de la copa.

- Altura comercial: distancia a lo largo del eje del fuste entre el suelo y la última sección comercialmente aprovechable.
- Altura del tocón: distancia entre el suelo y la zona del fuste donde el árbol es apeado.

Por último, el **factor de forma** es un factor de conversión del volumen del cilindro de referencia, determinado por el **DAP** y la altura, al volumen real del árbol (Prodan *et al.*, 1997). Este varía con la especie, el sitio y la edad (Raebild *et al.*, 2006). Su importancia reside en que, contando con el factor de forma para una determinada especie, se pueden elaborar tablas volumétricas de rodal a partir de datos de altura y **DAP**.

Entre la altura y el **DAP** existe una correlación que puede ser expresada por funciones matemáticas (Husch *et al.*, 1982). La información sobre la relación altura-diámetro de los árboles integrados en masas forestales se utiliza principalmente para caracterizar la estructura de la masa, para estimar el volumen de los árboles individuales o de la masa, y para determinar la altura dominante con el propósito de evaluar la calidad de sitio (Diéguez-Aranda *et al.*, 2005). Otra de sus aplicaciones se da en la estimación de altura en inventarios forestales y como uno de los módulos principales en los modelos de crecimiento orientados al manejo. Para ajustar la relación entre los **DAP** y las alturas en una masa forestal se han empleado numerosas funciones, tanto lineales como no lineales (Diéguez-Aranda *et al.*, 2005).

La estimación precisa de esta relación es importante debido a que la altura es una variable más difícil y costosa de medir en campo que el diámetro a la altura del pecho, y generalmente se mide solo en una muestra de árboles.

Las ecuaciones altura-diámetro pueden ser usadas para aplicaciones locales o tener un uso más generalizado (Sánchez-González *et al.*, 2007). La primera (función local)

normalmente depende del **DAP** y solo es aplicable a priori al rodal del cual fue extraída la información de altura y diámetro a la altura del pecho, mientras que en una ecuación generalizada, esta depende del **DAP** y de variables del rodal y puede ser usada a nivel regional (Sánchez-González *et al.*, 2007).

## **OBJETIVO**

**El objetivo de este trabajo es caracterizar la influencia de cinco marcos de plantación en la relación existente entre DAP y altura total en parcelas de *Populus x canadensis* “Conti 12” de 9 años de edad ubicadas en Alberti, Provincia de Buenos Aires.**

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Descripción del sitio**

#### *Ubicación*

El estudio se realizó en el Establecimiento Forestal María Dolores, ubicado en la localidad de Palentelén, partido de Alberti, Provincia de Buenos Aires, República Argentina (35° 10' S; 60° 15' W; 52 msnm).

#### *Clima*

La caracterización climática de la zona donde se llevó a cabo el trabajo, según la clasificación de Köppen-Geiger, es **Cfa**, denominado *clima templado lluvioso, sin estación seca y con verano caluroso*.

Este tipo climático está definido por temperaturas medias del mes más frío entre -3 y 19 °C, temperaturas medias del mes más cálido superiores a 22 °C y por la no existencia de una estación seca (lluvias uniformes durante todo el año) (Kottek *et al.*,

2006).

### *Suelo*

Clasificación taxonómica: Hapludol Típico, Limoso fino, mixto, térmico (USDA - Soil Taxonomy V. 2006).

La serie a la que corresponde es la serie Bragado, que presenta un paisaje de lomas muy suavemente onduladas. La capacidad de uso del mismo es II s, con un índice de productividad de 79,6. Los componentes que conforman la asociación, así como su porcentaje y posición en el terreno son: 1. Serie Bragado, 70% en lomas; 2. Serie Norumbega, 15% en lomas; 3. Serie Henry Bell, 15% en bajos.

Es un suelo profundo y liviano, de aptitud agrícola, que se encuentra en un paisaje suave a suavemente ondulado con relieve normal. Ocupa un relieve de lomas de la Subregión Pampa Arenosa, bien drenado, desarrollado sobre sedimentos loésicos franco arenosos que evoluciona sobre antiguos médanos estabilizados, remodelado en épocas más secas, no alcalino, no salino con pendiente de 0-1 %.

### **Material en estudio**

El clon evaluado en el ensayo fue *Populus x canadensis* cv. "Conti 12", proveniente de un ensayo establecido en 2003, instalado mediante estacas.

### **Diseño**

Se evaluaron cinco marcos de plantación diferentes, utilizándose parcelas de 100 árboles para cada uno de los marcos, con tres repeticiones, totalizando quince parcelas. El diseño utilizado fue un cuadrado de 10 filas por 10 hileras. Para el posterior análisis se consideró una bordura de dos árboles por lado en cada parcela, por lo que el diseño efectivo sobre el que se trabajó es de 6 filas por 6 hileras. Los



marcos de plantación utilizados fueron: 2,5 m x 2,5 m; 2 m x 3,5 m; 3,5 m x 2,5 m; 3,5 m x 2,8 m y 3,5 m x 3,5 m. El tamaño de parcela varió entre 625 m<sup>2</sup> y 1225 m<sup>2</sup>, dependiendo del marco de plantación.

*Tabla 1. Aquí*

### **Mediciones efectuadas**

Las determinaciones se llevaron a cabo en el mes de mayo de 2012. Se tomó el perímetro a 1,3 m del suelo con una cinta métrica milimetrada y posteriormente se procedió a su conversión a valores de diámetro (**DAP**). La altura total (**HT**) se midió con Blume-leiss. Estas mediciones se efectuaron sobre todos los árboles de cada parcela.

### **Modelos utilizados**

Se evaluaron los modelos presentados en la tabla 2, los cuales son citados en trabajos referentes al tema, haciendo mayor hincapié en modelos generalizados, pero también teniendo en cuenta aquellos modelos locales que suelen explicar de forma adecuada la relación altura-diámetro.

La totalidad de los modelos utilizados son intrínsecamente no lineales, por lo que la estimación de los parámetros requirió el empleo de un procedimiento iterativo. Para ello se trabajó con el método de optimización de Marquardt (Marquardt, 1963), implementado en el software STATGRAPHICS® Centurion XV (StatPoint, Inc. 1982-2007).

*Tabla 2. Aquí*

### **Indicadores de bondad de ajuste utilizados**

Para el análisis de la eficiencia de ajuste de los modelos se utilizaron los siguientes indicadores: el error cuadrático medio (ECM) [1], que analiza la precisión de las

estimaciones; el coeficiente de determinación ajustado por los grados de libertad ( $R^2_{aj}$ ) [2], que refleja la proporción de la variabilidad total explicada por el modelo teniendo en cuenta el número total de parámetro a estimar; y por último, el Criterio de Información de Akaike (AIC) [3] y el Criterio de Información Bayesiano o de Schwarz (BIC) [4], que permiten la comparación entre modelos penalizando aquellos con mayor cantidad de parámetros. A su vez, se analizaron los correspondientes gráficos de valores residuales vs valores predichos.

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum (Y_0 - \hat{Y})^2}{n}} \quad [1]$$

$$R^2_{aj} = 1 - \frac{SCR_{(n-1)}}{SCT} \quad [2]$$

$$AIC = -2 \log L + 2p \quad [3]$$

$$BIC = -2 \log L + p \log(n) \quad [4]$$

Donde:  $SCR$  es la suma de cuadrados residual,  $SCT$  es la suma de cuadrados total,  $L$  es el valor maximizado de la función de verosimilitud para el modelo estimado,  $p$  es el número de parámetros del modelo y  $n$  es el número de observaciones.

### **Efectos de los marcos**

Para cuantificar el efecto de los diferentes marcos de plantación sobre la relación altura-diámetro se analizó el efecto de la densidad sobre la conformación de los parámetros del modelo que presentó el mejor ajuste entre aquellos que se probaron, ingresando como variable predictora el Área de Incidencia (área que en promedio ocupa cada árbol, resultante de dividir la superficie ocupada por un grupo de plantas por el número de las mismas).

## RESULTADOS

### Análisis de los datos

*Tabla 3. Aquí*

Los valores medios de las variables altura total (**HT**) y diámetro a la altura del pecho (**DAP**) aumentan al incrementarse el espaciamiento entre individuos (**Tabla 3**). A la edad de las parcelas analizadas (9 años) la competencia se manifiesta de modo diferencial, dependiendo de la densidad de ejemplares utilizada en la plantación. Los Coeficientes de Variación para la variable **DAP** son superiores a los correspondientes a la variable **HT** para todos los tratamientos.

Al analizar los gráficos de dispersión de valores de **HT** en relación al **DAP** (**Figura 1**) se observa un incremento conjunto de ambos. Esto es confirmado por los Coeficientes de Correlación de Pearson (**Tabla 4**), que expresan una correlación positiva y estadísticamente significativa entre ambas variables para un nivel de significancia del 5% en todos los tratamientos.

*Figura 1. Aquí*

*Tabla 4. Aquí*

### Comparación entre tratamientos

El análisis de la varianza para **DAP** y **HT** según marcos de plantación sugiere (para la edad en estudio) la influencia diferencial de los tratamientos en la conformación del tamaño de los ejemplares (**Tabla 5**).

*Tabla 5. Aquí*

Los tests de comparaciones múltiples para las dos variables analizadas muestran resultados similares (**Tabla 6**) donde se observa que, en general y en función de la distinta intensidad de competencia asociada a las áreas de incidencia, la media se

incrementa al aumentar el espaciamiento.

*Tabla 6. Aquí*

A la edad de 9 años, para **HT**, los tratamientos se separan en tres grupos homogéneos: A. el tratamiento de mayor densidad; B. los dos tratamientos siguientes; C. los dos tratamientos de menor densidad. En el caso del **DAP**, si bien también hay tres grupos de tratamientos, uno de los marcos de plantación (3,5 m x 2 m) no se diferencia ni del de mayor densidad de plantas ni del de densidad intermedia.

### **Ajuste de los modelos HT-DAP**

Se ajustaron los modelos no lineales propuestos y se calcularon los indicadores ECM,  $R^2_{aj}$  (**Tabla 7**), AIC y BIC (**Tabla 8**).

*Tabla 7. Aquí*

Al analizar los resultados presentados en la **Tabla 7** se detecta un comportamiento similar entre ambos indicadores para los tratamientos analizados. En el caso del Error Cuadrático Medio (ECM) para el tratamiento de 2,5 m x 2,5 m los modelos que destacan sobre el resto, en orden decreciente de calidad de ajuste, son el **H**, **K**, **B** y **G**, mientras que para el resto de los tratamientos se destacan los modelos **H**, **G**, **K** e **I**; estos grupos de modelos son los que implican mayor precisión en el establecimiento de la relación entre variables. Los modelos **H**, **G** y **K** sobresalen según los indicadores analizados para todos los tratamientos puestos a prueba. En el caso del coeficiente de determinación ( $R^2_{aj}$ ) para el tratamiento de mayor densidad de plantas, los modelos que presentan mejor ajuste, ordenados de mayor a menor, son el **H**, **K**, **G** e **I**, mientras que para el resto de los tratamientos, los modelos que se destacan son los mismos pero se altera el orden, y queda en primer lugar el modelo **H**, luego el **G**, en tercer lugar el **K** y por último el modelo **I**. Resulta entonces que, según ambos indicadores, hay un grupo de modelos que expresa más eficientemente la variación de **HT** acorde a

la variación del **DAP** para cada Marco de Plantación por separado; dentro de ese grupo, los modelos **H** y **G** prevalecen sobre el resto.

*Tabla 8. Aquí*

En cuanto a la evaluación del comportamiento de los modelos según los Criterios de Información de Akaike (AIC) y de Schwarz (BIC) (**Tabla 8**), ambos generan caracterizaciones similares. Para todos los tratamientos puestos a prueba se observan tres modelos que sobresalen claramente del resto, a excepción del tratamiento 3,5 m x 2,5 m, donde el modelo **H** es aquel que presenta mejor ajuste: el modelo **G** presenta los valores más bajos para ambos indicadores (lo que implica un mejor ajuste), seguido por el **H** y luego el **K**. Estos tres modelos conforman un grupo homogéneo de mejor calidad que se separa del resto.

Al analizar en conjunto los valores presentados en las **tablas 7 y 8** se observa que los modelos **G** y **H** se destacan por sobre el resto. Si bien la ecuación **H** presenta un menor Error Cuadrático Medio y un mayor Coeficiente de Determinación ajustado que el modelo **G** en la mayoría de los tratamientos, los Criterios de Información de Akaike y de Schwarz, que penalizan los modelos con mayor cantidad de parámetros, son mejores en este último.

El análisis de significancia de los parámetros (**Tabla 9**) indica que, en el modelo **G**, todas las variables predictoras utilizadas contribuyen a explicar de manera satisfactoria la relación **HT-DAP** para cada marco de plantación testeado. En el modelo **H**, una de las variables predictoras (**DAP**) no aporta a la predicción de la variable respuesta (**HT**).

*Tabla 9. Aquí*

Sobre la base de los indicadores presentados en las **tablas 7, 8 y 9**, y teniendo en cuenta que el modelo **G** incluye variables de rodal que le permitirían aplicarse a un nivel regional, se rescató al mismo como superior al resto. Este es un modelo

generalizado que utiliza tres variables predictoras como valores de entrada: el diámetro dominante,  $D_0$  (definido como los 10 árboles con mayor diámetro a la altura del pecho de la masa), la altura dominante,  $H_0$  (definida como la altura total de los 10 árboles con mayor **DAP**) y el diámetro a la altura del pecho del individuo (**Tabla 10**).

*Tabla 10. Aquí*

Los gráficos de valores predichos vs los residuos por tratamiento (**Figura 2**) presentan una distribución homogénea de los mismos sin sesgos marcados. Acorde a lo descrito por los valores de ECM y CV, se observa una mayor dispersión en los tratamientos 3,5 m x 2 m y 3,5 m x 3,5 m con residuos entre (3;-3) m, mientras que en el resto de los tratamientos estos se ubican en el rango de (2;-2) m con un solo valor por encima de ese nivel. Por otro lado, se evidencia una mayor densidad de puntos sobre los valores más altos debido a la mayor cantidad de observaciones asociadas. Esta situación indica la no presencia de sesgos en la relación entre variables establecida por el modelo, por lo que en caso de utilizarse para estimar Alturas en función de **DAP** es de esperar que se compensen sobreestimaciones y subestimaciones.

*Figura 2. Aquí*

En la **Tabla 11** se presentan los parámetros del modelo para cada marco de plantación, incluyendo la estimación, error estándar, límites y P-valor de cada uno de ellos.

*Tabla 11. Aquí*

El valor estimado del **parámetro a** tiende disminuir a medida que aumenta el espaciamiento, mientras que el **b** muestra un comportamiento inverso. En todos los casos, el p-valor de la estimación es inferior a 0,0001 siendo, por lo tanto, estadísticamente significativos para definir el modelo, con una probabilidad superior al 99%.

El conjunto de modelos **HT-DAP** para cada marco de plantación se grafica en la **Figura 3**. El análisis de las curvas de **HT** en función de **DAP** para los cinco marcos de plantación puestos a prueba muestra que, para los **DAP** menores (hasta los 10 cm y con mayor intensidad en la condición central correspondiente a 5 cm), la relación entre estas dos variables varía en función de la densidad, distinguiéndose claramente los tratamientos con las situaciones extremas de competencia. Para el tratamiento que presenta la mayor densidad de individuos (2,5 m x 2,5 m) se observa que **HT** (para un mismo **DAP**) es superior al resto de los tratamientos, mientras que el tratamiento con mayor espaciamiento entre individuos presenta la menor **HT**. Los marcos de plantación que produjeron niveles de competencia intermedios mostraron un comportamiento intermedio pero con menor diferencia entre ellos.

Para las situaciones de valores intermedios de **DAP** (entre los 10 y 15 cm), la relación **HT-DAP** resulta similar en los cinco marcos de plantación experimentados.

Para las situaciones de valores mayores de **DAP** (más de 15 cm), la relación **HT-DAP** presenta diferencias entre tratamientos, aunque con menor intensidad que para los menores tamaños. La tendencia general indica que el marco correspondiente a mayor Área de Incidencia por planta está entre los que poseen mayor **HT** a mismo **DAP**, y el marco correspondiente a menor Área de Incidencia por planta está entre los que poseen menor **HT** a mismo **DAP**. Los resultados corresponden a una edad específica (9 años) y las relaciones descritas no han de ser necesariamente iguales a cualquier edad. Resultaría interesante practicar los estudios realizados a diferentes edades y con el conocimiento del momento en que se producen las culminaciones de incrementos para ambas variables.

*Figura 3. Aquí*

### Ajuste del modelo HT-DAP-Densidad

La variable utilizada para cuantificar la influencia de la densidad en el modelo fue el Área de Incidencia (AI), que representa el espacio que tiene cada individuo para desarrollarse. En la **Tabla 12** se listan los valores de  $R^2$  y coeficiente de correlación de los modelos probados que presentaron el mejor ajuste al momento de definir los parámetros en función del Area de Incidencia. Para el parámetro **a** el modelo que mostró el mejor ajuste fue del tipo parabólico [5] y para el parámetro **b** fue del tipo cuadrado de Y, inversa de X [6].

$$a = \frac{\alpha \cdot AI}{\beta + AI} \quad [5]$$

$$b = \sqrt{\gamma + (\delta / AI)} \quad [6]$$

El modelo final ( $G_{AI}$ ), con sus parámetros ajustados, quedó de la siguiente forma:

$$HT = \frac{H_0}{1 - \left( \frac{\alpha \cdot AI}{\beta + AI} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{D_0}{DAP} \right)^{\sqrt{\gamma + \left( \frac{\delta}{AI} \right)}} \right)}$$

El modelo final mostró un comportamiento satisfactorio cuando se probó con los pares **HT-DAP** utilizados para ajustar el modelo inicial, con un  $R^2_{aj}$  de 90,72 y un ECM de 0,7. En la **Tabla 13** se detalla el valor calculado, error estándar, límites y P-valor para los parámetros del nuevo modelo ( $G_{AI}$ ).

*Tabla 12. Aquí*

*Tabla 13. Aquí*

El análisis de los residuos vs los valores predichos por el modelo (**Figura 4**) muestra una gran similitud con lo graficado para el modelo **HT-DAP (G)**: el modelo  $G_{AI}$  reproduce de manera aceptable el comportamiento del modelo original para cada uno de los tratamientos de densidad testeados. Es de esperar que su uso produzca



estimaciones insesgadas, donde subestimaciones y sobreestimaciones se compensen.

*Figura 4. Aquí*

## DISCUSION

Existe una asociación entre el Área de Incidencia y el crecimiento individual como consecuencia de una mayor disponibilidad de recursos aportados por el ambiente (en razón de una menor intensidad de competencia).

Los valores de **DAP** se encuentran dentro de los valores citados por Monteoliva *et al.* (2007) para varios clones de *Populus* en condiciones de sitio y manejo, y para edades similares a las utilizadas en este ensayo. A su vez, los valores de **HT** son coincidentes con aquellos mencionados por Achinelli (2006) en rodales destinados a triturado, ubicados en suelos de las mismas características. Además, los componentes ambientales del lugar del ensayo coinciden en términos generales con los correspondientes a situaciones predominantes en los centros de desarrollo de Silvicultura de álamos en la llanura pampeana (Teodelina, Palentelén, Morse y Vedia) mencionados por Achinelli (2006). Por un lado, todos estos sitios poseen el mismo régimen climático (Cfa) y por el otro, la serie Bragado se encuentra presente en varios partidos de la Provincia de Buenos Aires, abarcando zonas donde se encuentran algunas de las plantaciones citadas anteriormente (Partidos de Alberti y Junín) y presenta similitudes con las series de suelo sobre la que se ubican las restantes (Serie Vedia, Vedia; Serie Santa Isabel, Teodelina). Es posible entonces considerar la aplicación de los resultados de este trabajo a plantaciones similares ubicadas en dichos sitios, o a nuevas plantaciones en ambientes similares a los descritos para el ensayo. La precaución que se debe tener en cuenta al momento de asociar o diferenciar calidades de sitio por análisis de pares de datos edad-tamaño se relaciona con el hecho de tratarse de un taxón de rápido crecimiento, sensiblemente afectado en

su desarrollo por variaciones en la secuencia climática asociada a un período de rotación en particular. Esta situación sugiere la necesidad de replicar los ensayos en el tiempo.

Los valores de correlación entre las variables en estudio son similares a los obtenidos por Arias Aguilar (2004) al trabajar con varias especies. Debe tenerse en cuenta que no hay información acerca de la culminación de los incrementos de las variables de tamaño analizadas según marcos de plantación; los análisis que se realizan refieren a una edad fija que no necesariamente impacta del mismo modo en el incremento de las variables medidas para los diferentes marcos y en la relación entre las mismas.

Estudios realizados por Marquina (2010) en *Populus deltoides* 'Stoneville 66', en situaciones similares de densidad de plantas pero para una edad inferior (7 años), presentan similar influencia de la densidad de plantación respecto al Área basal individual media. Este clon suele ser utilizado en las mismas zonas que el clon en estudio, y ambos suelen manejarse con prácticas muy similares. La influencia diferencial del Área de Incidencia en el tamaño de los ejemplares pudo haberse manifestado a edades previas, con un impacto factible e importante de ponderar.

La conformación de 3 grupos homogéneos de **DAP** y **HT** podría asociarse a los distintos momentos de culminación de los respectivos incrementos, influida además por las diferentes áreas de incidencia. Es posible que, con el paso del tiempo y por efecto de la diferente situación de competencia, los tratamientos que se encuentran dentro del mismo grupo lleguen a diferenciarse para generar 5 grupos (para cada variable). Es importante contar con mediciones y análisis similares a los realizados para diferentes edades correspondientes a la rotación del cultivo; esto permitirá tomar decisiones acerca de prácticas culturales, corta final y momento de cálculo de indicadores de peso en tamaño y forma.

Los valores de  $R^2_{aj}$  para el modelo G son superiores a los calculados por Misir (2010) para *Populus tremula* y Peng (1999) para *Populus tremuloides*, en modelos diferentes destacados positivamente por los autores, y ligeramente inferiores a los reportados en modelos seleccionados por Saunders *et al.* (2008) para *Populus tremuloides* y por Diéguez-Aranda *et al.* (2005) utilizando el mismo modelo, pero para *Pinus sylvestris*. A su vez, los valores de ECM obtenidos por este último autor son inferiores a los alcanzados por el modelo para este caso en particular, así como los valores de AIC, considerando estos valores como aceptables para describir la relación HT-DAP.

En base a los resultados puede deducirse que el mayor grado de competencia observado a mayor densidad (con respecto a los demás tratamientos) genera individuos de mayor altura. En el otro extremo, para el marco de plantación de 3,5 m x 3,5 m, plantas de igual **DAP** poseen la menor **HT**.

Los indicadores de bondad de ajuste para el modelo  $G_{AI}$  son similares a los reportados por Saunders *et al.* (2008), trabajando con *Populus tremuloides*, y Zeide *et al.* (2002), en *Pinus taeda*, utilizando ecuaciones que incorporan a la densidad como variable predictora de **HT**. El modelo  $G_{AI}$  resulta adaptable a situaciones como la del clon en estudio donde no solo puede ser plantado con diferentes marcos, sino que además la

densidad de fustes puede disminuir en rotaciones sucesivas por pérdida de cepas luego de cada corta de aprovechamiento.

## CONCLUSIÓN

En ejemplares de *Populus x canadensis* "Conti 12" de 9 años de edad, la utilización de diferentes marcos de plantación (2,5 m x 2,5 m; 2 m x 3,5 m; 2,5 m x 3,5 m; 2,8 m x 3,5 m y 3,5 m x 3,5 m) influye en la relación **DAP-HT** de los mismos.

La relación entre **DAP** y **HT** para cada marco de plantación estudiado puede ser descrita de modo satisfactorio por el modelo **G**. El mismo posee una buena expectativa de aplicación a nivel regional ya que involucra variables de caracterización de la masa.

Las diferencias en la relación **DAP-HT** de los ejemplares para los distintos marcos de plantación varían también en función del **DAP** considerado, no existiendo proporcionalidad en la relación.

Existe una asociación entre los parámetros de los modelos ajustados para cada marco de plantación y el Área de Incidencia correspondiente a cada marco.

La influencia de los marcos de plantación estudiados en la conformación de la relación **HT-DAP** puede ser descrita por un único modelo que incluya al área de incidencia como una de las variables estimadoras de **HT**.

## BIBLIOGRAFÍA

**Achinelli, F., G. Denegri & R. Marlats.** 2004. Evolución y perspectivas del cultivo de Salicáceas en la pampa húmeda argentina. SAGPyA Forestal 32: 14-23.

**Achinelli, F.** 2006. Silvicultura de álamos y sauces en la Pampa húmeda. Actas de las Jornadas de Salicáceas 2006. Buenos Aires. Argentina. 21-36.

**Arias Aguilar, D.** 2004. Estudio de las relaciones altura-diámetro para seis especies maderables utilizadas en programas de reforestación en la Zona Sur de Costa Rica. Kurú: Revista Forestal 1(2): 1-11.

**Baskerville, G.** 1962. Production in Forests. Canadian Department of Forestry, Forest Research Branch. Fredericton. 83 pp.

**Ball, J., J. Carle & A. Del Lungo.** 2005. Contribución de álamos y sauces a la silvicultura sostenible y al desarrollo rural. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/008/a0026s/a0026s02.htm>. Ultimo acceso: Noviembre de 2011.

**Braier, G.** 2004. Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. Informe Nacional Argentina. Secretaría de ambiente y desarrollo sustentable de la nación argentina. Secretaría de agricultura, ganadería, pesca y alimentos de la nación argentina. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. 78 pp.

**Borodowski, E. & R. Suárez.** 2004. El cultivo de álamos y sauces: su historia en el Delta del Paraná. SAGPyA Forestal 32: 5-13.

**Calderon, A., V. Settepani, J. Bustamante & N. Riu.** 2005. Comparación de materiales y épocas de plantación para *Populus* sp. Mendoza (Argentina). Rev. FCA UNCuyo. 37 (1): 61-65.

**Cañadas, N., C. García & G. Montero.** 1999. Relación altura-diámetro para *Pinus pinea* L. en el Sistema Central. Congreso de Ordenación y Gestión Sostenible de Montes. Santiago de Compostela. España. Tomo I: 139-153.

**Coetzee, J.** 1991. The influence of stand density on the yield of *Eucalyptus grandis*: a comparison between a good site and a poor site at age 4 years. IUFRO Symposium. Intensive Forestry. The role of Eucalypts. Durban, South Africa, 2-6 de septiembre. Vol. 2: 901-916.

**Clutter, J., J. Fortson, L. Pienaar, G. Brister & R. Bailey.** 1983. Timber management: a quantitative approach. John Wiley & Sons. New York. 333 pp.

**Comisión Internacional del Álamo.** 2004. Informe de la 22ª Reunión de la Comisión y de la 42ª Reunión de su Comité Ejecutivo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, enero de 2005. 78pp.

**Comisión Internacional del Álamo.** 2008. Síntesis de los informes nacionales de progreso recibidos, elaborados para la 23ª Reunión de la Comisión Internacional del Álamo, FAO en colaboración con la Universidad Forestal de Beijing, China, 27–30 de octubre de 2008. Documento de trabajo de la Comisión Internacional del Álamo IPC/6, División de Ordenación Forestal, FAO, Roma (inédito). 79 pp.

**Comisión Nacional del Álamo.** 2004. República Argentina Informe Nacional. SAGPyA.

**Curtis, R.** 1967. Height-Diameter and Height-Diameter-Age Equations For Second-Growth Douglas-Fir. Forest Science 13(4): 365-375.

**Daniel, P., U. Helms & F. Baker.** 1982. Principios de Silvicultura. Ed. Mc Graw-Hill. México DF. 492 pp.

**Diéguez-Aranda, U., M. Barrio Anta, F. Castedo Dorado & J.G. Álvarez González.** 2005. Relación altura-diámetro generalizada para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en el noroeste de España. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 14(2): 229-241.

**Dirección de Forestación - SAGPyA.** 2001. Primer Inventario de Plantaciones Forestales y Establecimiento de un Banco de Datos. Informe Final. Volumen 1. Buenos Aires. Argentina. Disponible en: <http://www.minagri.gob.ar/new/0-0/forestacion/inventario/Inventario2.htm>. Último acceso: Noviembre de 2011.

**Dirección de Producción Forestal - MAGyP.** 2009. Sector Forestal Año 2008. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Secretaría de Agricultura, Ganadería y

Pesca. Subsecretaría de Agricultura. Dirección de Producción Forestal. Buenos Aires. Argentina. 38 pp.

**García, J. D.** 2002. Forestación con Salicáceas en áreas bajo riego de Patagonia. Núcleo de Extensión Forestal Patagonia. SAGPyA. 36 pp.

**Gaffrey, D.** 1988. Forstamts-und bestandesindividuelles Sortimentierungsprogramm als Mittel zur Planung, Aushaltung und Simulation. Tesis de grado. Forstwissenschaftlicher Fachbereich. 86 pp.

**Husch, B., C. Miller & T. Beers.** 1982. Forest Mensuration. Third Edition. John Wiley & Sons. USA. 402 pp.

**Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf & F. Rubel.** 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift 15 (3): 259-263.

**Lopez Peña, C.** 2008. Estudio de la espesura de las masas forestales. Curso de dasometría. Ingeniería Agroforestal. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/dasometria/contenidos-ocw-2008/>. Último acceso: mayo de 2012.

**Marquardt, D.** 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. SIAM Journal on Applied Mathematics 11 (2): 431–441.

**Marquina, J.** 2010. Populus deltoides ‘Stoneville 66’. Evolución de la ocupación del sitio a diferentes densidades de plantación, hasta los 7 años de edad. Trabajo Técnico. Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina.

**Misir, N.** 2010. Generalized height-diameter models for Populus tremula L. stands. African Journal of Biotechnology 9(28): 4348-4355.

**Mønness, E.** 1982. Diameter distributions and height curves in even-aged stands of

*Pinus sylvestris* L. Norsk Institutt For Skogforskning 36: 1-43.

**Monteoliva, S. & R. Marlats.** 2007. Efecto del sitio, clon y edad sobre el crecimiento y la calidad de madera en sauces de corta rotación. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 16(1): 15-24.

**Nilson, A.** 1999. Pidev metsakorraldus - mis see on. Pidev metsakorraldus. *EPMÜ Metsandusteaduskonna toimetised* 32: 4-13.

**Peng, C.** 1999. Nonlinear height-diameter models for nine boreal forest tree species in Ontario. Forest research report n° 155. Ontario Forest Research Institute. 34 pp.

**Prodan, M., R. Peters, F. Cox & J. Real.** 1997. Mensura forestal. IICA-BMZ/GTZ. San José. 586 pp.

**Raebild, A. & H. Meilby.** 2006. Cálculo de tablas volumétricas y tablas de crecimiento. Informe técnico Proyecto FOMABO No. 2 - 2006. Proyecto FOMABO/ UMSS / UAGRM /KVL. Cochabamba, Bolivia. 20 pp.

**Sánchez-González, M., I. Cañellas & G. Montero.** 2007. Generalized height-diameter and crown diameter prediction models for cork oak forests in Spain. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 16(1): 76-88.

**Saunders, M. & R. Wagner.** 2008. Height-Diameter Models with Random Coefficients and Site Variables for Tree Species of Central Maine. *Annals of Forest Science* 65(2): 203.

**Schmidt, A. von.** 1967. Der rechnerische ausgleich von bestandeshohenkurven, *Forstwissenschaftliches Zentralt Blatt* 86: 370-382.

**Smith, M.** 1962. The practice of silviculture. John Wiley & Sons. New York. 578 pp.

**Wabö, E.** 2006. Determinación del volumen de madera en pie, en bosques y rodales. *SAGPyA Forestal* 38: 8-11.



**Zeide, B. & C. Vanderschaaf.** 2002. The effect of density on the height-diameter relationship. Proceedings of the eleventh biennial southern silvicultural research conference. Gen. Tech. Rep. SRS-48. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 622 pp.

**Tabla 1.** Equivalencias entre marco de plantación, densidad de plantas y área de incidencia.

Marco de Plantación (m x m)	Densidad de plantas (plantas/hectárea)	Área de Incidencia (m <sup>2</sup> )
2,5 x 2,5	1600	6,25
3,5 x 2	1429	7
3,5 x 2,5	1143	8,75
3,5 x 2,8	1020	9,8
3,5 x 3,5	816	12,25

**Tabla 2.** Modelos a utilizar.

Nombre	Modelo	Referencias
A	$HT = 1,3 + \left( a \cdot \left( \frac{1}{DAP} - \frac{1}{D_0} \right) + \left( \frac{1}{H_0 - 1,3} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^{-3}$	Mønness, 1982
B	$HT = 1,3 + (H_0 - 1,3) \cdot e^{a \left( 1 - \frac{D_0}{DAP} \right) + b \left( \frac{1}{D_0} - \frac{1}{DAP} \right)}$	Gaffrey, 1988
C	$HT = 1,3 + (H_0 - 1,3) \cdot \left( \frac{DAP}{D_0} \right)^a$	Cañadas et al., 1999
D	$HT = 1,3 + \frac{DAP}{\frac{D_0}{H_0 - 1,3} + a \cdot (D_0 - DAP)}$	Cañadas et al., 1999
E	$HT = 1,3 + (H_0 - 1,3) \cdot \frac{1 - e^{a \cdot DAP}}{1 - e^{a \cdot D_0}}$	Cañadas et al., 1999
F	$HT = 1,3 + \left( a \cdot \left( \frac{1}{DAP} - \frac{1}{D_0} \right) + \left( \frac{1}{H_0 - 1,3} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-2}$	Cañadas et al., 1999
G	$HT = \frac{H_0}{1 - a \cdot \left( 1 - \left( \frac{D_0}{DAP} \right)^b \right)}$	Nilson, 1999
H	$HT = 1,3 + \frac{DAP^2}{a + b \cdot DAP + c \cdot DAP^2}$	Curtis, 1967
I	$HT = 1,3 + (a + b/DAP)^{-2,5}$	Schmidt, 1967
J	$HT = a + b \cdot \log(DAP)$	Logarítmica
K	$HT = e^{a + b \left( \frac{1}{DAP} \right)}$	Exponencial
L	$HT = a \cdot DAP^b$	Parábola incompleta

**Tabla 3.** Caracterización inicial de las variables medidas a campo.

Variable	Tratamiento	Media	Máximo	Mínimo	C.V. (%)
HT (m)	2,5 m x 2,5 m	17,7	21,0	11,0	11,6
	3,5 m x 2 m	18,4	22,5	8,0	16,2
	3,5 m x 2,5 m	18,4	21,0	10,0	13,9
	3,5 m x 2,8 m	19,2	22,0	12,0	11,6
	3,5 m x 3,5 m	19,4	23,5	8,0	16,7
DAP (cm)	2,5 m x 2,5 m	14,7	20,9	6,9	22,3
	3,5 m x 2 m	15,5	23,6	5,4	27,7
	3,5 m x 2,5 m	16,4	24,2	6,4	26,4
	3,5 m x 2,8 m	18,0	24,9	7,5	24,9
	3,5 m x 3,5 m	18,2	26,3	6,2	27,2

**Tabla 4.** Coeficientes de Correlación de Pearson entre HT y DAP para cada tratamiento de marco de plantación.

Tratamiento	Coeficiente de Correlación HT-DAP	Valor-P
2,5 m x 2,5 m	0,89	<0,0001
3,5 m x 2 m	0,91	<0,0001
3,5 m x 2,5 m	0,90	<0,0001
3,5 m x 2,8 m	0,89	<0,0001
3,5 m x 3,5 m	0,86	<0,0001

**Tabla 5.** Análisis de la varianza para DAP y HT según marcos de plantación.

Variable	Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
HT	Entre grupos	267,141	4	66,7851	9,23	<0,00001
	Intra grupos	3907,21	540	7,23557		
	Total (Corr.)	3936,15	544			
DAP	Entre grupos	1291,69	4	322,923	17,08	<0,00001
	Intra grupos	10206,59	540	18,9011		
	Total (Corr.)	10282,20	544			

**Tabla 6.** Test de comparaciones múltiples para HT y DAP.

Variables	Tratamiento	Media	Grupos Homogéneos	
HT (m)	2,5 m x 2,5 m	17,7	A	
	3,5 m x 2 m	18,4		B
	3,5 m x 2,5 m	18,4		B
	3,5 m x 2,8 m	19,2		C
	3,5 m x 3,5 m	19,4		C
DAP (cm)	2,5 m x 2,5m	14,7	A	
	3,5 m x 2 m	15,5	A	B
	3,5 m x 2,5 m	16,4		B
	3,5 m x 2,8 m	18,0		C
	3,5 m x 3,5 m	18,2		C

**Tabla 7.** Error Cuadrático Medio (ECM) y Coeficiente de determinación ajustado por grados de libertad ( $R^2_{aj}$ ) de todos los modelos puestos a prueba para cada tratamiento de densidad.

Modelo	Tratamientos									
	2,5 m x 2,5 m		3,5 m x 2 m		3,5 m x 2,5 m		3,5 m x 2,8 m		3,5 m x 3,5 m	
	ECM	$R^2_{aj}$	ECM	$R^2_{aj}$	ECM	$R^2_{aj}$	ECM	$R^2_{aj}$	ECM	$R^2_{aj}$
A	0,60	85,6	0,95	89,4	0,76	88,3	0,59	88,2	1,64	84,4
B	0,58	86,1	0,89	90,0	0,69	89,4	0,55	88,8	1,50	85,8
C	0,84	80,0	1,47	83,4	1,39	78,8	0,94	81,1	2,65	74,9
D	0,67	84,1	1,27	85,7	0,93	85,8	0,67	86,5	1,96	81,4
E	0,60	85,7	0,98	89,0	0,70	89,3	0,54	89,1	1,67	84,1
F	0,62	85,2	0,98	88,9	0,80	87,7	0,60	87,8	1,72	83,7
G	0,58	86,2	0,80	91,0	0,45	93,1	0,45	91,0	1,08	89,7
H	0,54	87,0	0,80	91,1	0,43	93,4	0,44	91,0	1,08	89,7
I	0,58	86,1	0,87	90,3	0,59	91,0	0,54	89,1	1,47	86,1
J	0,62	85,2	0,92	89,7	0,70	89,3	0,64	87,2	1,61	84,7
K	0,56	86,7	0,82	90,8	0,52	92,0	0,51	89,8	1,30	87,6
L	0,71	83,0	1,14	87,2	0,93	85,7	0,76	84,7	2,10	80,1



**Tabla 8.** Criterio de Información de Akaike (AIC) y de Schwarz (BIC) de todos los modelos puestos a prueba para cada marco de plantación.

Modelo	Tratamientos									
	2,5 m x 2,5 m		3,5 m x 2 m		3,5 m x 2,5 m		3,5 m x 2,8 m		3,5 m x 3,5 m	
	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
A	271,3	276,8	367,6	373,3	354,9	360,7	316,1	321,9	536,2	542,4
B	268,3	276,5	360,3	369,0	342,8	351,5	309,3	318,1	522,8	532,0
C	309,0	314,5	425,5	431,2	436,8	442,7	379,8	385,7	612,9	619,0
D	282,8	288,3	388,5	394,2	381,5	387,4	334,1	339,9	564,7	570,8
E	270,4	275,9	371,7	377,5	343,2	349,0	305,0	310,8	539,1	545,3
F	274,0	279,5	372,6	378,4	361,8	367,6	320,6	326,4	543,7	549,9
G	259,6	267,8	345,9	354,6	283,7	292,5	280,0	288,7	471,0	480,3
H	261,4	272,4	346,8	358,3	278,3	290,0	280,6	292,3	472,0	484,3
I	267,9	276,1	356,9	365,5	320,2	329,0	306,6	315,3	519,3	528,6
J	275,8	284,0	364,7	373,3	344,4	353,1	328,3	337,0	534,4	543,6
K	263,3	271,6	349,1	357,8	304,2	312,9	297,1	305,9	500,3	509,5
L	291,3	299,6	392,9	401,6	383,5	392,3	352,7	361,4	576,5	585,8

**Tabla 9.** Valores estimados de los parámetros correspondientes a los modelos probados y su correspondiente nivel de significancia para los diferentes tratamientos de marco de plantación.

Modelo	Parám.	Tratamientos									
		2,5 m x 2,5 m		3,5 m x 2 m		3,5 m x 2,5 m		3,5 m x 2,8 m		3,5 m x 3,5 m	
		Estimado	Signific.	Estimado	Signific.	Estimado	Signific.	Estimado	Signific.	Estimado	Signific.
A	a	0,780	**	0,891	**	0,760	**	0,760	**	0,908	**
B	a	0,079	-	0,046	-	-0,133	-	-0,014	-	-0,776	-
	b	4,338	-	5,839	-	8,922	-	6,247	-	26,612	-
C	a	0,404	**	0,453	**	0,366	**	0,349	**	0,418	**
D	a	-0,036	**	-0,033	**	-0,037	**	-0,037	**	-0,033	**
E	a	-0,107	**	-0,091	**	-0,109	**	-0,107	**	-0,091	**
F	a	0,735	**	0,834	**	0,712	**	0,708	**	0,844	**
G	a	0,188	**	0,107	**	0,060	**	0,070	**	0,058	**
	b	1,420	**	2,015	**	2,331	**	2,169	**	2,480	**
H	a	2,738	*	3,134	**	3,910	**	3,688	**	5,666	**
	b	-0,027	-	-0,022	-	-0,170	*	-0,133	-	-0,324	*
I	c	0,049	**	0,044	**	0,052	**	0,050	**	0,053	**
	a	0,267	**	0,254	**	0,264	**	0,267	**	0,254	**
J	b	0,844	**	0,973	**	0,883	**	0,823	**	1,023	**
	a	-2,754	*	-5,891	**	-3,405	**	-1,397	*	-6,569	**
K	b	7,684	**	9,047	**	7,911	**	7,229	**	9,104	**
	a	3,287	**	3,389	**	3,315	**	3,306	**	3,398	**
L	b	-5,824	**	-6,816	**	-6,170	**	-5,907	**	-7,284	**
	a	5,414	**	4,706	**	5,423	**	6,364	**	4,809	**
	b	0,443	**	0,504	**	0,440	**	0,386	**	0,485	**

- No significativo (>0,05)

\* Significativo (0,05 a 0,0001)

\*\* Altamente significativo (<0,0001)

**Tabla 10.** Diámetro dominante ( $D_0$ ) y altura dominante ( $H_0$ ) para los diferentes marcos de plantación.

Tratamiento	$D_0$ (cm)	$H_0$ (m)
2,5 m x 2,5 m	20,1	19,8
3,5 m x 2 m	22,2	21,4
3,5 m x 2,5 m	23,3	20,5
3,5 m x 2,8 m	24,3	21,1
3,5 m x 3,5 m	25,2	21,8

**Tabla 11.** Estimación, error estándar, límites y P-valor de los parámetros utilizados por el modelo **G** para cada marco de plantación.

Tratamiento	Parámetro	Estimación	Error Estándar	Límites		P-valor
				Inferior	Superior	
2,5 m x 2,5 m	a	0,18833	0,043	0,104	0,273	<0,0001
	b	1,42039	0,201	1,021	1,819	<0,0001
3,5 m x 2 m	a	0,10674	0,016	0,075	0,138	<0,0001
	b	2,01524	0,149	1,721	2,309	<0,0001
3,5 m x 2,5 m	a	0,06031	0,007	0,047	0,074	<0,0001
	b	2,33151	0,114	2,106	2,556	<0,0001
3,5 m x 2,8 m	a	0,07017	0,012	0,046	0,094	<0,0001
	b	2,16986	0,152	1,868	2,470	<0,0001
3,5 m x 3,5 m	a	0,05785	0,008	0,042	0,074	<0,0001
	b	2,48001	0,135	2,214	2,746	<0,0001

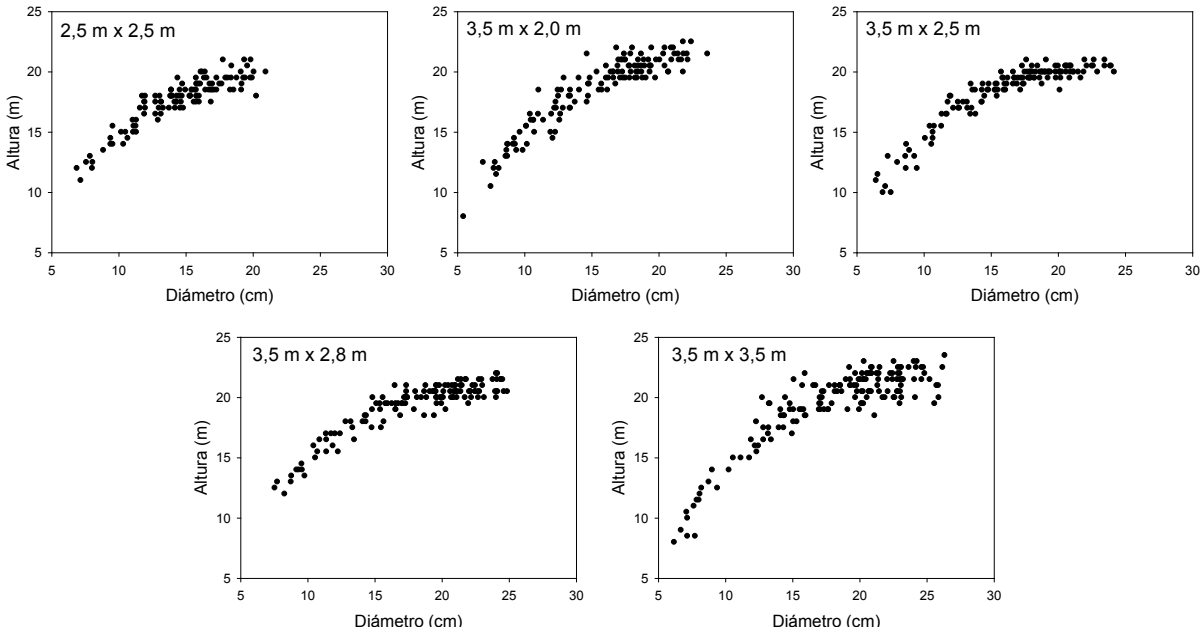
**Tabla 12.** Coeficiente de Correlación y  $R^2$  de los modelos que presentaron el mejor ajuste al momento de relacionar los parámetros del modelo **G** en función del Área de Incidencia.

Parámetro	Modelo	Coeficiente de Correlación	$R^2$
a	<b>Hiperbólico</b>	<b>0,92</b>	<b>96,1</b>
	Doble Inverso	-0,92	86,3
	Curva S	0,91	83,8
	Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	0,90	81,0
	Inversa-Y Log-X	0,89	80,9
b	<b>Cuadrado-Y Inversa de X</b>	<b>-0,91</b>	<b>83,6</b>
	Inversa de X	-0,89	80,8
	Cuadrado-Y Log-X	0,89	79,5
	Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,88	79,0
	Curva S	-0,87	77,1

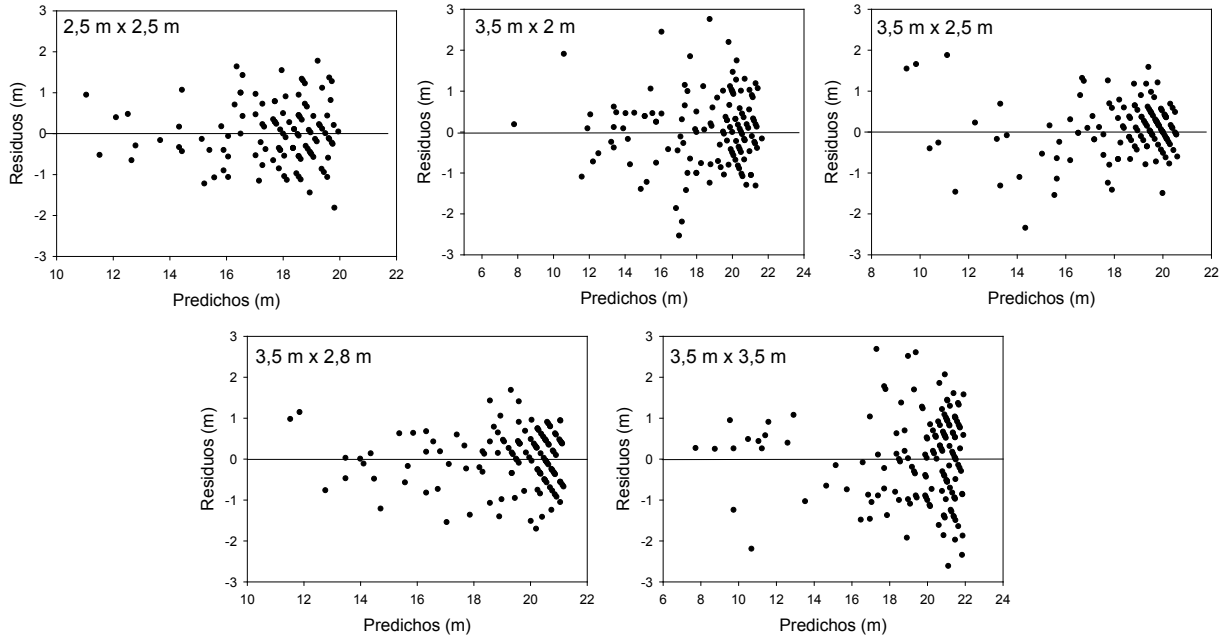
**Tabla 13.** Estimación, error estándar, límites y P-valor de los parámetros utilizados por el modelo  $G_{AI}$ , válido para cualquier densidad de plantación.

Modelo	Parámetro	Estimación	Error Estándar	Límites		P-valor
				Inferior	Superior	
$G_{AI}$	alfa	0,03350	0,004	0,026	0,041	<0,0001
	beta	-4,5095	0,324	-5,144	-3,875	<0,0001
	gamma	8,98469	0,973	7,078	10,892	<0,0001
	delta	-33,1023	7,881	-48,549	-17,656	<0,0001

Figura 1. Pares DAP-HT según marcos de plantación.

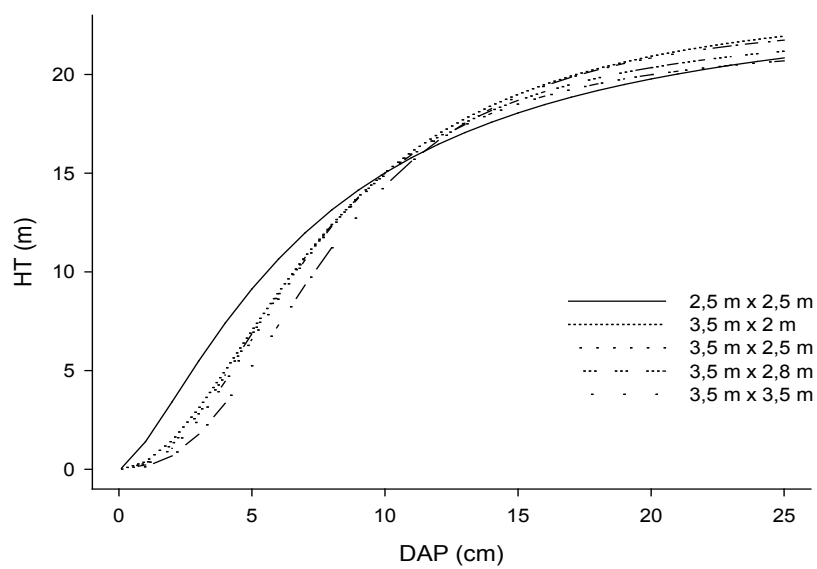


**Figura 2.** Gráficos de residuos frente a valores predichos del modelo **G** para los cinco marcos de plantación.





**Figura 3.** Curvas generadas por el modelo **G** según marcos de plantación.



**Figura 4.** Gráficos de residuos frente a valores predichos del nuevo modelo  $G_{AI}$  generado para los cinco marcos de plantación.

